

## Research of the work states of car engines in conditions simulated a traffic in cities

*Abstract: The study presents the empirical research results of static operating conditions of internal combustion engines of passenger cars and light trucks (delivery vans) in traffic conditions in cities. The study formally introduced the concept of conditions and status of internal combustion engine. Results of researches were conducted in driving tests: urban UDC and – for comparison purposes – non-urban EUDC. Engine operating conditions were analyzed in the areas of process value, setting among others one-dimensional and two-dimensional probability density processes of speed and torque. Significant differences were found in the specified characteristics both because of traffic conditions, determined by the type of test, and because of the analyzed processes. Such significant differences in characteristics of engine work states in different vehicle operating conditions justify the purposefulness of more complex adjusting the control algorithms for the working processes of engines to their working conditions.*

*Key words: internal combustion engines, engine work states, driving tests, simulation of conditions of car traffic.*

### Badania stanów pracy silników samochodów w warunkach symulujących ruch w miastach

*Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań empirycznych statycznych stanów pracy silników spalinowych samochodu osobowego i lekkiego samochodu ciężarowego (dostawczego) w warunkach ruchu w miastach. W pracy wprowadzono formalnie pojęcia warunków i stanu pracy silnika spalinowego. Przeprowadzono wyniki badań w testach jezdnych: miejskim UDC oraz – w celach porównawczych – pozamijskim EUDC. Stany pracy silnika analizowano w dziedzinach wartości procesu, wyznaczając m.in. jednowymiarowe i dwuwymiarowe gęstości prawdopodobieństwa procesów prędkości obrotowej i momentu obrotowego. Stwierdzono znaczne różnice w wyznaczonych charakterystykach zarówno ze względu na warunki ruchu pojazdów, zdeterminowane rodzajem testu, jak i ze względu na analizowane procesy. Tak znaczne różnice właściwości stanów pracy silników spalinowych w różnych warunkach pracy pojazdów uzasadniają celowość coraz bardziej złożonego dostosowywania algorytmów sterowania procesów roboczych silników do warunków ich pracy.*

*Słowa kluczowe: silniki spalinowe, stany pracy silnika, testy jezdne, symulacja warunków ruchu samochodów.*

## 1. Wprowadzenie

Właściwości użytkowe silników spalinowych są zdeterminowane stanami statycznymi, w których te silniki znajdują się, oraz występowaniem stanów dynamicznych. W związku z tym jest celowa identyfikacja tych stanów w typowych warunkach użytkowania silników spalinowych, w szczególności w warunkach zdeterminowanych w przepisach certyfikacyjnych. W literaturze spotyka się liczne przykłady takich badań [4–8].

Stan pracy silnika spalinowego jest opisany zbiorem  $S$  wielkości, charakteryzujących tę pracę, przede wszystkim procesy zachodzące w silniku podlegające sterowaniu oraz właściwości energetyczne, ekonomiczne i ekologiczne, a także inne procesy towarzyszące pracy silnika [3].

Warunki pracy silnika są zdeterminowane warunkami otoczenia, sterowaniem silnika przez operatora oraz oporem, zależnym od charakteru pracy

wykonywanej przez pojazd lub maszynę. Warunki pracy silnika mogą opisane zbiorem wielkości  $W$  [3].

Pracę silnika opisuje zbiór  $P$ , będący sumą zbiorów  $S$  i  $W$ , przy czym w ogólności iloczyn zbiorów  $S$  i  $W$  nie jest zbiorem pustym [3].

Formalnie praca silnika ma charakter statyczny, jeśli wszystkie wielkości, opisujące pracę silnika, są niezależne od czasu  $t$ , tzn. [3]

$$\frac{\partial P(t)}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

Jeśli dla którejkolwiek wielkości, opisującej pracę silnika, ten warunek nie jest spełniony, praca silnika ma charakter dynamiczny. Taka definicja procesu statycznego ma sens tylko w teorii. W rzeczywistości należy sformułować tę definicję w zależności od rozpatrywanego zakresu częstotliwości procesów i w zależności od przyjętej dokładności. Zatem warunek statyczności procesu w zakresie

częstotliwości mniejszej od  $f_g$ , z dokładnością  $\varepsilon$ , będącą wielkością dodatnią, jest następujący [3]:

$$\frac{\partial \bar{P}_i(t)}{\partial t} < \varepsilon_i \quad (2)$$

przy czym proces  $\bar{P}(t)$  jest procesem  $P(t)$ , poddanym filtracji idealnym filtrem dolnoprzepustowym o częstotliwości zaporowej równej  $f_g$ .

W zbiorze stanów pracy silnika spalinowego można wyróżnić wielkości, determinujące właściwości użytkowe silnika. Należą do nich wielkości, charakteryzujące intensywność wykonywania pracy, a więc prędkość obrotową  $n$ , obciążenie, którego miarą jest zazwyczaj moment obrotowy  $M_e$  oraz stan cieplny, scharakteryzowany zbiorem temperatur części silnika oraz jego czynników roboczych  $T$  [2]. Przy ustabilizowanym stanie cieplnym silnika jego właściwości użytkowe są zależne zatem od prędkości obrotowej i obciążenia. Te wielkości są z kolei zdeterminowane warunkami pracy urządzenia, napędzanego przez silnik, oraz właściwościami układu napędowego i roboczego. W wypadku silników samochodowych procesem determinującym stan pracy silnika spalinowego jest przede wszystkim proces prędkości pojazdu [2]. Z tego powodu właściwości silników samochodowych bada się w testach jezdnych, w których warunki pracy silnika są określone przebiegiem prędkości pojazdu. Jednocześnie jednak stan pracy silnika jest zależny m.in. od parametrów układu napędowego i jezdny. Zatem zapewnienie spełnienia przez silnik wymagań jest zależne nie tylko od właściwości silnika, związanych z jego immanentnymi cechami, ale i od stanów pracy, zdeterminowanych przeniesieniem napędu.

W związku z tym w pracy przedstawiono wyniki badań statycznych stanów pracy silników dwóch samochodów, różniących się zasadniczo, użytkowanych w warunkach symulujących eksploatację trakcyjną.

Obiektami badań były:

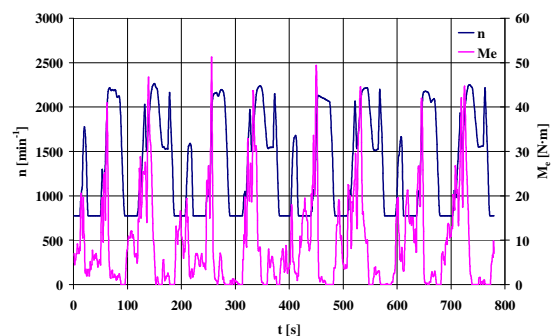
- samochód osobowy Opel Corsa 1.3 CDTI z czterocylindrowym rzędowym silnikiem o zapłonie samoczynnym o znamionowej mocy użytecznej 55 kW przy prędkości obrotowej  $4000 \text{ min}^{-1}$ , o objętości skokowej  $1248 \text{ cm}^3$ , z pięciobiegową skrzynią sterowaną ręcznie,
- lekki samochód ciężarowy Mercedes Sprinter 513 CDI z czterocylindrowym rzędowym silnikiem o zapłonie samoczynnym o znamionowej mocy użytecznej 95 kW przy prędkości obrotowej  $4300 \text{ min}^{-1}$ , o objętości skokowej  $2143 \text{ cm}^3$ , z sześciobiegową skrzynią sterowaną ręcznie.

Badania przeprowadzono w teście UDC (*Urban Driving Cycle*), symulującym jazdę miejską oraz – dla porównania – w teście EUDC (*Extra Urban Driving Cycle*), odpowiadającym jeździe poza miastami.

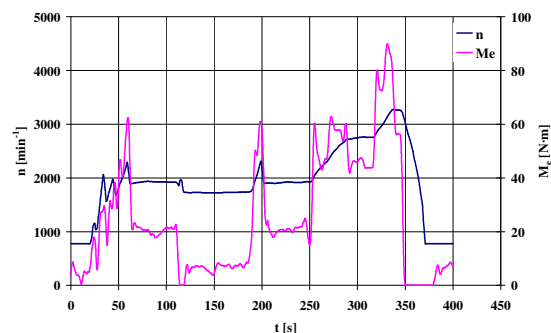
## 2. Badania empiryczne stanów pracy silników

Badania stanów pracy silników przeprowadzono na hamowni podwozowej w Przemysłowym Instytucie Motoryzacji w Warszawie. Laboratorium jest wyposażone w hamownię podwozową typu EMDY 48 firmy Schenck-Komeg z jedną rolką o średnicy 48”.

Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono przebiegi prędkości obrotowej i nieujemnego momentu obrotowego w testach EDC i EUDC dla silnika samochodu Opel.

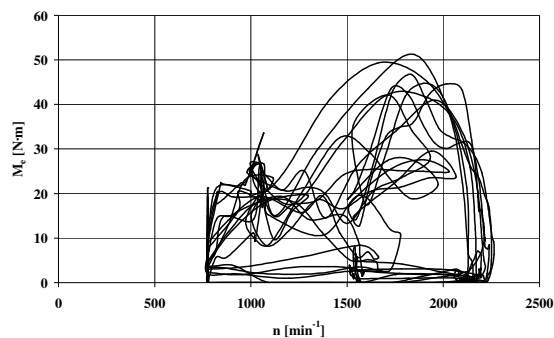


Rys. 1. Przebiegi prędkości obrotowej i nieujemnego momentu obrotowego w teście UDC dla silnika samochodu Opel

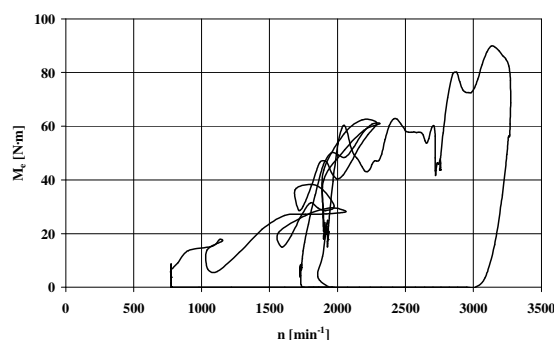


Rys. 2. Przebiegi prędkości obrotowej i nieujemnego momentu obrotowego w teście EUDC dla silnika samochodu Opel

Przebiegom tym odpowiadają zbiory stanów na charakterystyce prędkościowej – rysunki 3 i 4.

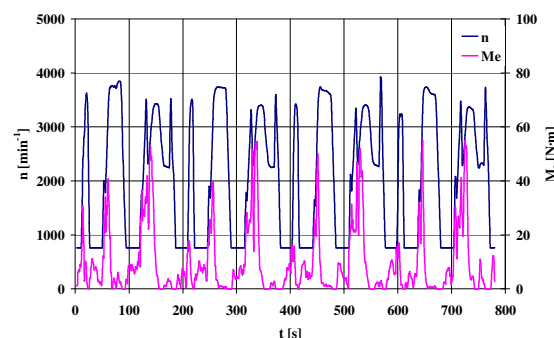


Rys. 3. Zbiór stanów pracy silnika samochodu Opel w teście UDC w współrzędnych charakterystyki prędkościowej

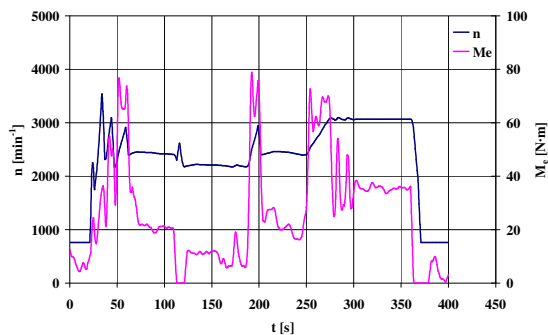


Rys. 4. Zbiór stanów pracy silnika samochodu Opel w teście EUDC w współrzędnych charakterystyki prędkościowej

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono przebiegi prędkości obrotowej i nieujemnego momentu obrotowego dla silnika samochodu Mercedes w testach UDC i EUDC.

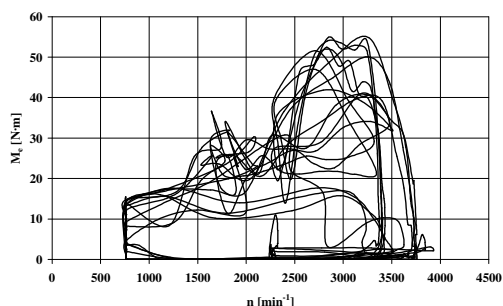


Rys. 5. Przebiegi prędkości obrotowej i nieujemnego momentu obrotowego w teście UDC dla silnika samochodu Mercedes

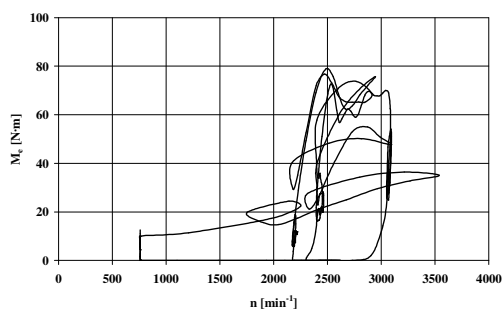


Rys. 6. Przebiegi prędkości obrotowej i nieujemnego momentu obrotowego w teście EUDC dla silnika samochodu Mercedes

Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono w współrzędnych charakterystyki prędkościowej zbiory stanów pracy silnika samochodu Mercedes w testach UDC i EUDC.



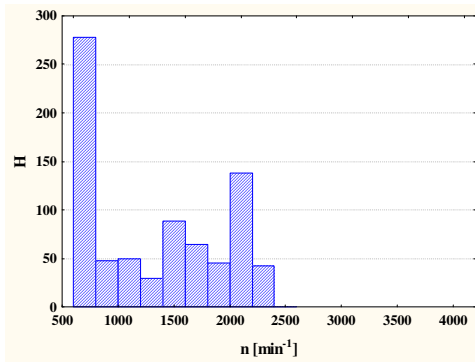
Rys. 7. Zbiór stanów pracy silnika samochodu Mercedes w teście UDC w współrzędnych charakterystyki prędkościowej



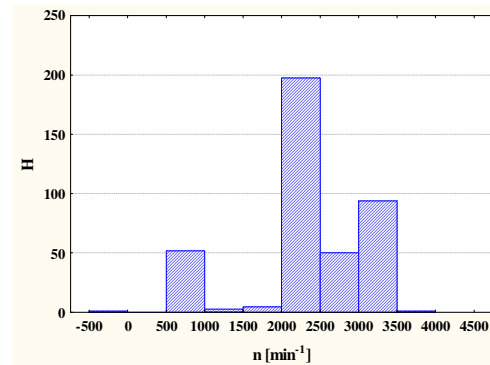
Rys. 8. Zbiór stanów pracy silnika samochodu Mercedes w teście EUDC w współrzędnych charakterystyki prędkościowej

Analizy stanów pracy silników przeprowadzono w dziedzinie wartości procesów.

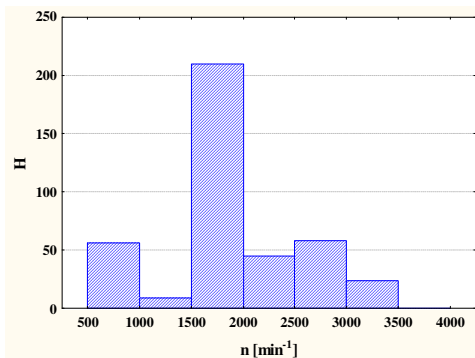
Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono histogramy prędkości obrotowej silnika samochodu Opel, a na rysunkach 11 i 12 samochodu Mercedes w testach UDC i EUDC.



Rys. 9. Histogram prędkości obrotowej silnika samochodu Opel w teście UDC

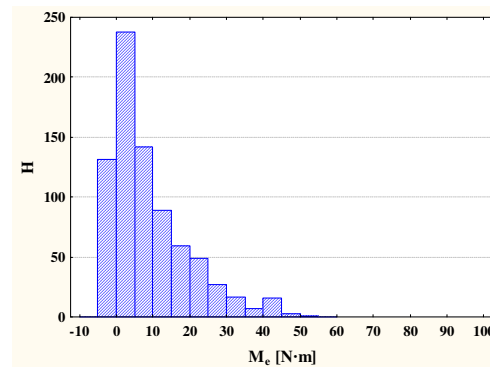


Rys. 12. Histogram prędkości obrotowej silnika samochodu Mercedes w teście EUDC

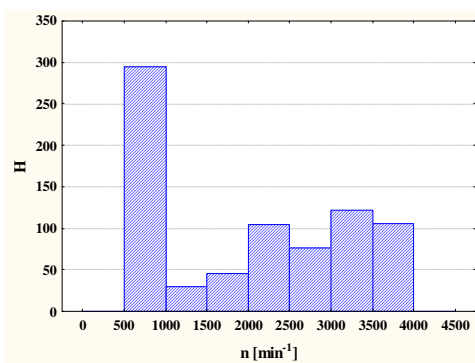


Rys. 10. Histogram prędkości obrotowej silnika samochodu Opel w teście EUDC

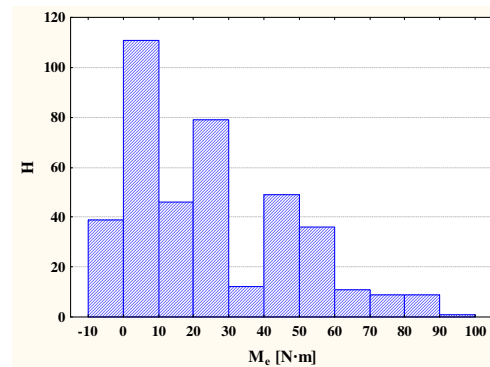
Wyraźnie jest widoczne przesunięcie mediany w stronę większych prędkości obrotowych dla testu EUDC, co jest naturalnym skutkiem większych prędkości jazdy w teście pozamiejskim niż w teście miejskim.



Rys. 13. Histogram nieujemnego momentu obrotowego silnika samochodu Opel w teście UDC

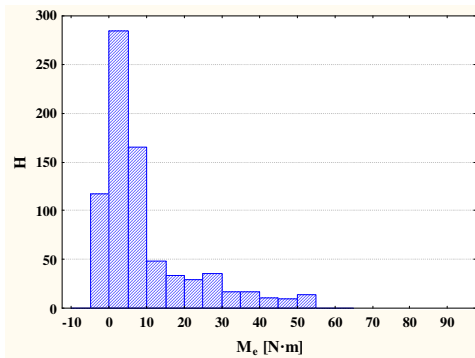


Rys. 11. Histogram prędkości obrotowej silnika samochodu Mercedes w teście UDC

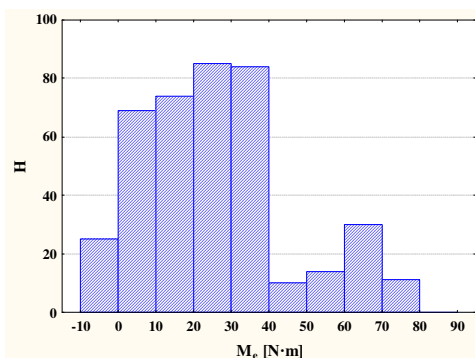


Rys. 14. Histogram nieujemnego momentu obrotowego silnika samochodu Opel w teście EUDC

Podobnie, jak w wypadku prędkości obrotowej, tak i dla nieujemnego momentu obrotowego jest widoczne wyraźne przesunięcie mediany w stronę większego obciążenia dla testu pozamiejskiego.

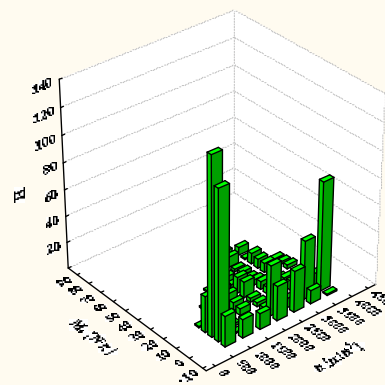


Rys. 15. Histogram nieujemnego momentu obrotowego silnika samochodu Mercedes w teście UDC

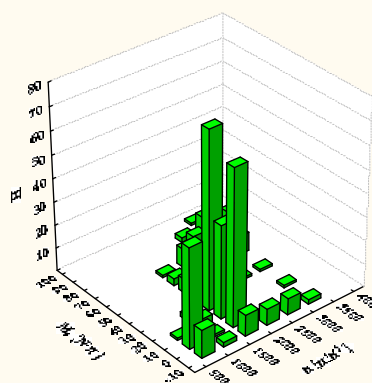


Rys. 16. Histogram nieujemnego momentu obrotowego silnika samochodu Mercedes w teście EUDC

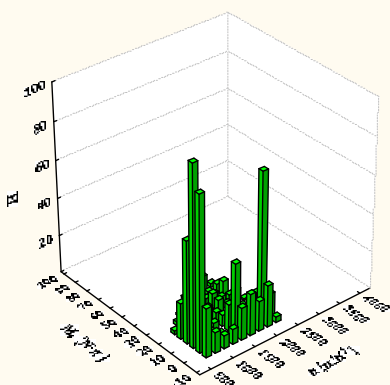
Różnice w charakterach histogramów prędkości obrotowej i nieujemnego momentu obrotowego w testach UDC i EUDC są w zasadzie podobne dla silników samochodów Opel i Mercedes, co potwierdzają dwuwymiarowe histogramy prędkości obrotowej i nieujemnego momentu obrotowego, przedstawione na rysunkach 17 i 18.



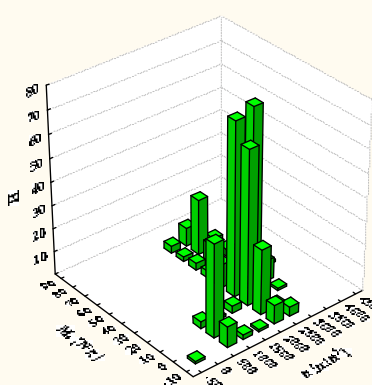
Rys. 18. Dwuwymiarowy histogram prędkości obrotowej i nieujemnego momentu obrotowego dla silników samochodów Mercedes w teście UDC



Rys. 19. Dwuwymiarowy histogram prędkości obrotowej i nieujemnego momentu obrotowego dla silników samochodów Opel w teście EUDC

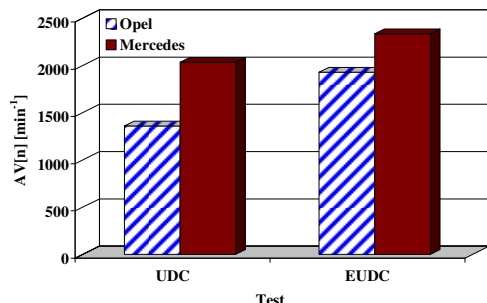


Rys. 17. Dwuwymiarowy histogram prędkości obrotowej i nieujemnego momentu obrotowego dla silników samochodów Opel w teście UDC

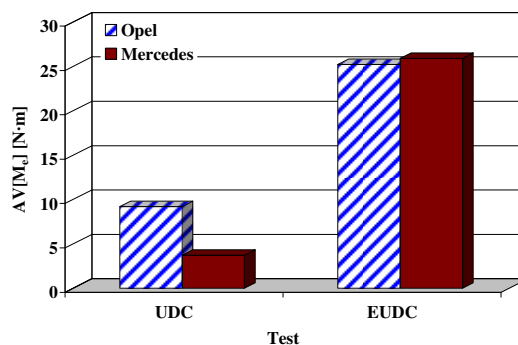


Rys. 20. Dwuwymiarowy histogram prędkości obrotowej i nieujemnego momentu obrotowego dla silników samochodów Mercedes w teście EUDC

Bardziej szczegółowa analiza wskazuje jednak, że w wypadku silnika samochodu Mercedes wrazliwość na warunki ruchu jest mniejsza dla prędkości obrotowej, zaś większa dla obciążenia niż w wypadku silnika samochodu Opel – rysunki 21 i 22.



Rys. 21. Wartość średnia prędkości obrotowej w teście UDC i EUDC dla silników samochodów Opel i Mercedes



Rys. 22. Wartość średnia nieujemnego momentu obrotowego w teście UDC i EUDC dla silników samochodów Opel i Mercedes

### 3. Uwagi końcowe

Mimo znacznych podobieństw wpływu warunków ruchu samochodu na stany pracy silnika dla różnych pojazdów daje się zauważyć różnice, mogące skutkować różnicami właściwości użytkowych silników. Potwierdza to celowość doboru algorytmów sterowania procesów roboczych silników dla konkretnych ich zastosowań [1].

### Nomenclature/Skróty i oznaczenia

**P** zbiór opisujący pracę silnika  
**S** zbiór stanów pracy silnika  
**W** zbiór warunków pracy silnika  
**t** czas  
**M<sub>e</sub>** moment obrotowy  
**n** prędkość obrotowa

**T** zbiór opisujący stan cieplny silnika  
**H** liczność próbki w klasie  
**AV** operator wartości średniej  
**UDC** Urban Driving Cycle (*miejski test jezdny*)  
**EUDC** Extra Urban Driving Cycle (*pozamiejski test jezdny*)

### Bibliography/Literatura

- [1] Chłopek Z., Domański D.: Badania optymalizacyjne algorytmów sterowania silnika o zapłonie samoczynnym. *Archiwum Motoryzacji* 1/2007. 7–19. 80%.
- [2] Chłopek Z.: Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych. *Prace Naukowe. Seria „Mechanika”* z. 173. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1999.
- [3] Chłopek Z.: The remarks for research of internal combustion engines in dynamic states. *Silniki Spalinowe – Combustion Engines*. (In print).
- [4] Duoba M., Ng H.; Larsen R.: In-Situ Mapping and Analysis of the Toyota Prius Hev Engine. SAE Paper 2000–01–3099. Future Transportation Technology Conference & Exposition. August 2000, Costa Mesa, CA, USA.
- [5] Gambino M., Pianese C., Rizzo G.: Experimental and computational analysis of a dynamic model for control strategy optimization in a spark ignition engine. *American Control Conference*, 1994. Vol. 2. 2374–2378.
- [6] Hafner M., Isermann R.: Multiobjective optimization of feedforward control maps in engine management systems towards low consumption and low emissions. *Transactions of the Institute of Measurement and Control* March 2003 25: 57–74.
- [7] López J.M. et al.: Emissions Pollutant from Diesel, Biodiesel and Natural Gas Refuse Collection Vehicles in Urban Areas. *Highway and Urban Environment Alliance for Global Sustainability Bookseries*. 2010, Volume 17, Part 2. 141–148.
- [8] Min B. et al.: Direct Measurement of Powertrain Component Efficiencies for a Light-Duty Vehicle with a CVT Operating over a Driving Cycle. SAE Paper 2003–01–3202. SAE Powertrain & Fluid Systems Conference & Exhibition, October 2003, Pittsburg, PA, USA.

---

Mr Zdzisław Chłopek, DSc., DEng. – Professor in the Faculty of Automotive and Construction Machinery Engineering at Warsaw University of Technology.

*Dr hab. inż. Zdzisław Chłopek – profesor na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej.*



Mr Jacek Biedrzycki, Eng. – Engineer in the Automotive Industry Institute in Warsaw.

*Inż. Jacek Biedrzycki – inżynier w Przemysłowym Instytucie Motoryzacji w Warszawie.*

